

**ELS PREMIS NOBEL
DE L'ANY 2005
SOBRE EL
PREMI NOBEL DE FÍSICA
CONCEDIT A
ROY J. GLAUBER, JOHN L. HALL
I THEODOR W. HÄNSCH,
PER RAMÓN CORBALÁN,
DEL GRUP D'ÒPTICA
DEL DEPARTAMENT DE FÍSICA
DE LA UNIVERSITAT AUTÒNOMA
DE BARCELONA**

**NOVA LLUM EN ÒPTICA QUÀNTICA. EN EL CENTENARI
DEL FOTÓ, UNS INVESTIGADORS EN ÒPTICA QUÀNTICA
GUANYEN EL PREMI NOBEL DE FÍSICA 2005**

RESUM

La meitat del Premi Nobel de Física de l'any 2005 s'ha concedit a Roy J. Glauber «per la seva contribució a la teoria quàntica de la coherència òptica» i l'altra meitat conjuntament a John L. Hall i Theodor W. Hänsch «per les contribucions al desenvolupament de l'espectroscòpia làser i, en especial, la tècnica de la pinta de freqüències òptiques». Es premien, per tant, investigacions teòriques i experimentals en òptica quàntica. Tot seguit es comenten i s'analitzen aquestes aportacions dels guardonats.

14

PARAULES CLAU: òptica quàntica, coherència òptica, espectroscòpia làser, làsers de femtosegons, fibres de cristall fotònic, pinta de freqüències òptiques, mesures de precisió, rellotges atòmics.

ABSTRACT

One half of the 2005 Nobel Prize in Physics was awarded to Roy J. Glauber “for his contribution to quantum theory of optical coherence”, while the other half was shared by John L. Hall and Theodor W. Hänsch “for their contributions to the development of laser-based precision spectroscopy, including the optical frequency comb technique”. Thus, both theoretical and experimental researchs were recognized. Here the awardee's contributions are commented on and analyzed.

KEY WORDS: quantum optics, optical coherence, laser spectroscopy, femtosecond lasers, photonic crystal fibers, optical frequency comb, precision measurements, atomic clocks.

Els fenòmens òptics ens han apassionat des de ben antic. Els estudis dissenyats per descobrir la natura de la llum han estat un dels autèntics motors de la física, i aquest és l'objectiu de l'òptica, que és una de les àrees més actives de la física. N'és una prova la ràpida successió de premis Nobel en aquest camp en anys recents: 1997, 2001 i 2005.

La meitat de l'últim Premi ha estat per a Roy J. Glauber, de la Universitat Harvard (EUA), «per les seves contribucions a la teoria quàntica de la coherència òptica». L'altra meitat s'ha atorgat a parts iguals a John L. Hall, del Joint Institute for Laboratory Astrophysics (JILA) (Universitat de Colorado i National Institute of Standards and Technology), de Boulder (EUA), i a Theodor W. Hänsch, del Max-Planck-Institut für Quantenoptik, de Garching, i de la Universitat Ludwig Maximilian de Munic (Alemanya), «per les seves contribucions al desenvolupament de mètodes d'espectroscòpia làser de precisió, incloent-hi la tècnica de la pinta de freqüències òptiques» (figura 1).

15

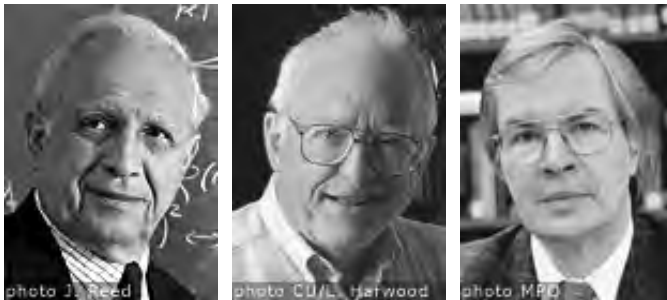


FIGURA 1. Fotografies dels premiats. D'esquerra a dreta, Roy J. Glauber, John L. Hall i Theodor W. Hänsch. Fotografies: Copyright © The Nobel Foundation.

Amb aquest guardó han estat premiades investigacions teòriques i experimentals. Les primeres, orientades a descobrir les característiques quàntiques de la llum; les segones, centrades en el desenvolupament de mètodes per a determinar mitjançant la llum l'estructura quàntica de la matèria i verificar teories fonamentals cada cop més precises. De fet, la precisió última que es pot assolir en mesures experimentals està limitada per fluctuacions quàntiques que es manifesten en el que es coneix com a *soroll quàntic*. D'aquesta manera, queda establerta la profunda connexió entre ambdós tipus de recerca premiats aquest any amb el Nobel.

Les reaccions de la comunitat científica han estat molt positives, atès el gran prestigi dels guardonats. Recollim algunes opinions de destacats membres de la comunitat internacional. Segons Maciej Lewenstein i Jürgen Eschner, de l'Institut de Ciències Fotòniques (ICFO) de Barcelona, «Glauber, Hänsch i Hall són molt estimats pels seus col·legues científics. A les endevinalles sobre qui guanyaria el Nobel, ells eren en els primers llocs de la llista des de feia temps i l'acord sobre la seva concessió és molt ampli». Per a Peter Knight, de l'Imperial College de Londres, «els tres guardonats són figures mundials en òptica quàntica. Tots tres són magnífics. És un gran any per a l'òptica a tot arreu!»

QUÈ ÉS LA LLUM?

Del segle XVII al naixement de l'òptica quàntica

Des de l'antiguitat s'han anat proposant diverses respostes a la pregunta «què és la llum?» En el segle XVII es va establir una controvèrsia ona-partícula entre els que, com Descartes i Huygens, mantenien que la llum era un moviment ondulatori, anàleg al so, i els que, com Newton, deien que la llum consistia en un flux de partícules.

Tot i la notable autoritat de Newton, observacions experimentals posteriors varen anar donant suport a poc a poc a la imatge ondulatoria i, amb l'establiment de la teoria electromagnètica de Maxwell, a finals del segle XIX es considerava de manera unànime que la llum era una ona electromagnètica. Semblava que s'havia aconseguit la resposta definitiva. Un grau tal de satisfacció, però, no va durar gaire. L'any 1900, Max Planck (premi Nobel de Física 1918), per tal d'explicar l'espectre d'emissió dels cossos calents, va introduir la idea que la llum tèrmica emet i absorbeix l'energia de manera discreta en forma de quàntums de llum.

Fa un segle, l'any 1905, Einstein (premi Nobel 1921) generalitzà la idea anterior de Planck tot establint que la mateixa llum està formada per quàntums discrets, que posteriorment es designaren com a *fotoons*. D'aquesta manera, va explicar les característiques de l'anomenat *efecte fotoelèctric*, que consisteix en l'emissió d'electrons per mitjà dels metalls en ser il·luminats per radiacions de longitud d'ona curta. Cal assenyalar que la major part dels detectors actuals de llum es basen en l'efecte fotoelèctric. Així va aparèixer, en el cas de la llum, la dualitat ona-partícula: la llum, que en molts experiments es comporta com una ona, en d'altres ho fa com un flux de partícules. Ambdues imatges, però, són incompatibles en el marc de la física clàssica. Per tant, es va haver d'iniciar la revolució quàntica que permetés desenvolupar una nova física, capaç d'integrar les imatges corpuscular i ondulatoria per al mateix objecte físic.

En la dècada de 1920, Louis-Victor de Broglie (premi Nobel 1929) generalitzà la idea de dualitat en les partícules materials. Werner Heisenberg (premi Nobel 1932), Erwin Schrödinger, Paul Dirac (compartiren el Premi Nobel 1933) i d'altres establiren les bases de la mecànica quàntica. Fermi i Dirac començaren l'estudi de la interacció entre la llum quantitzada i els àtoms, i afermaren l'anomenada *electro-*

dinàmica quàntica no relativista (QED no relativista). Mitjançant aquesta teoria, en la dècada de 1930, Wigner i Weisskopf estudiaren la dinàmica de l'emissió espontània de llum pels àtoms i es varen trobar per primera vegada amb el problema de les divergències que envoltarien la QED. El problema de les divergències el varen resoldre Sin-itiro Tomonaga, Julian Schwinger i Richard P. Feynman (compartiren el Premi Nobel 1965) en la dècada de 1940 mitjançant la tècnica de la renormalització. D'aquesta manera es va establir la QED com la teoria física més precisa desenvolupada fins al moment. Un altre fet rellevant d'aquesta dècada i que va impulsar l'experimentació en QED fou l'observació de Willis Lamb (premi Nobel 1955) del desplaçament que porta el seu nom en l'estructura de l'estat $n = 2$ de l'hidrogen.

L'any 1956, Hanbury-Brown i Twiss introduïren un nou tipus d'experiments en òptica, la interferometria d'intensitats, i observaren l'efecte que porta el seu nom. Aquest efecte originà una notable controvèrsia en l'època, perquè alguns el consideraven una manifestació del caràcter corpuscular de la llum, mentre que d'altres en proposaven explicacions clàssiques. L'any 1960, es va inventar el làser, considerat com una de les aportacions més importants de la física en el segle XX. Charles H. Townes, Nicolaj G. Basov i Aleksandr M. Prokhorov compartiren el Premi Nobel de l'any 1964 per aquest invent.

L'any 1963, Roy J. Glauber, en adonar-se que «la teoria quàntica ha tingut una influència sobre l'òptica que és solament una fracció de la influència que l'òptica ha tingut històricament sobre la teoria quàntica», inicià una aplicació sistemàtica de la QED als problemes òptics. De fet, ha rebut el Premi Nobel per dos articles teòrics i una breu nota resum d'aquests publicada el 1963.¹ Els articles, «The quantum

1. R. J. GLAUBER (1963a, 1963b, 1963c).

theory of optical coherence» i «Coherent and incoherent states of the radiation field», són obres mestres d'enginy, rigor i claredat que han estat els fonaments del gran desenvolupament de l'òptica quàntica i que han contribuït al seu establiment com a disciplina independent.

CONTRIBUCIONS DE GLAUBER L'ANY 1963:
TEORIA QUÀNTICA DE LA COHERÈNCIA ÒPTICA

En els articles esmentats, Glauber tractà de qüestions fonamentals adreçades a obtenir informació sobre el flux de fotons d'un feix de llum. Va desenvolupar la teoria quàntica de la fotodetecció i va establir els observables del camp electromagnètic que es poden mesurar amb estudis de coincidències retardades en la detecció de fotons per detectors varis.

Com es pot distingir un feix de llum provinent d'una làmpada i un de llum làser? *A priori*, hom diria que ambdues llums són diferents, atès que les làmpades operen per emissió espontània i els seus diferents àtoms actuen de manera independent. Aquest tipus de llum s'anomena *caòtica*. Per contra, els làsers operen per emissió estimulada i tots els seus àtoms actuen de manera perfectament sincronitzada (figura 2).

19

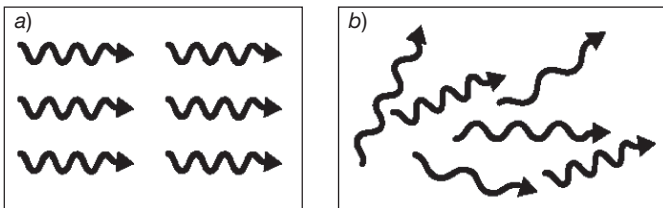


FIGURA 2. Diferència entre a) llum làser i b) llum procedent d'una làmpada. En la llum làser les ones emeses pels diferents àtoms tenen la mateixa fase, longitud d'ona i direcció.

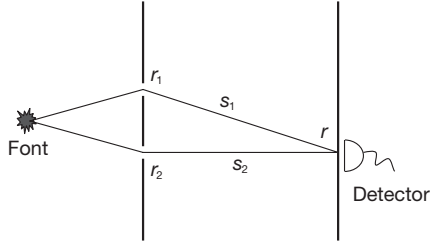


FIGURA 3. Esquema per a l'observació d'interferències amb la doble esletxa de Young.

Malgrat això, Glauber demostrà que si es filtra un feix de llum caòtica fins a deixar-lo amb el mateix contingut espectral que un feix làser, ambdós tipus de llum no es podrien distingir en els experiments interferencials que s'utilitzen convencionalment en òptica, com ara la doble esletxa de Young, esquematitzada a la figura 3.

20

Va observar també que aquests experiments són sensibles únicament a correlacions del camp de primer ordre: la intensitat que mesura el detector en l'instant t depèn del valor mitjà del producte $\mathbf{E}^*(\vec{r}_1, t_1)\mathbf{E}(\vec{r}_2, t_2)$ dels valors del camp

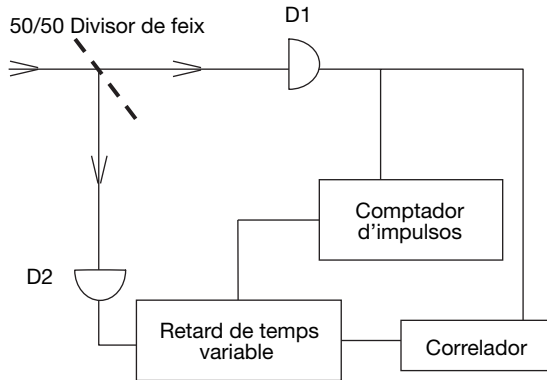


FIGURA 4. Esquema de l'interferòmetre d'intensitats de Hanbury-Brown i Twiss.

elèctric de l'ona en cada una de les escaletes, agafats en instants de temps anteriors $t_i = t - s_i/c$, ($i = 1, 2$). Per a tenir una caracterització més completa dels diferents feixos de llum, Glauber va introduir una successió de funcions de correlació per a les amplituds complexes del camp, i va demostrar que la llum caòtica filtrada i la llum làser es podien distingir mitjançant l'estudi de les correlacions de segon ordre. Aquestes correlacions es poden mesurar amb l'interferòmetre d'intensitats introduït per Hanbury-Brown i Twiss (figura 4).

Tal com demostrà Glauber, l'observable $C(\tau)$ que es mesura amb aquest interferòmetre és una funció de correlació de segon ordre (implica les intensitats del camp en dos punts espaciotemporals diferents, és a dir, quatre amplituds complexes del camp).

$$C(\tau) = \langle I_1(t)I_2(t+\tau) \rangle = \langle E^{(-)}(\vec{r}_1, t_1)E^{(-)}(\vec{r}_2, t_2)E^{(+)}(\vec{r}_2, t_2)E^{(+)}(\vec{r}_1, t_1) \rangle$$

21

Encara més, amb l'interferòmetre de Hanbury-Brown i Twiss es poden distingir també feixos de llum clàssics (és a dir, que es poden descriure mitjançant les equacions de Maxwell) i feixos de llum quàntics (que solament es poden descriure en termes de la física quàntica). A la figura 5 es mostra esquemàticament el tipus de resultats que s'obtenen en aquests casos.

Quan s'utilitza la radiació tèrmica, s'obté per $C(\tau)$ una corba en la zona clàssica (ombrejat en blau) amb un màxim per $\tau = 0$. Aquest és el comportament observat per primera vegada per Hanbury-Brown i Twiss i indica que els fotons en aquest tipus de llum viatgen agrupats («bunched»);² Malgrat això, és possible explicar també aquest comportament en termes completament clàssics, sense fer servir el concepte de

2. R. HANBURY-BROWN i R. Q. TWISS (1956).

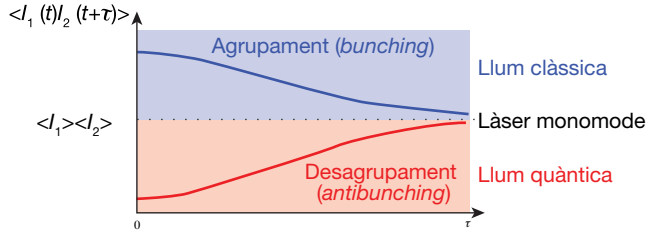


FIGURA 5. Esquema dels diferents tipus de resultats que s'obtenen amb l'interferòmetre d'intensitats de Hanbury-Brown i Twiss, segons el tipus de llum que s'analitzi.

22

fotó. Els làsers quasi monocromàtics (que emeten en un sol mode) produeixen una corba $C(\tau)$ plana que fa de frontera entre els dominis clàssic i quàntic. Un feix de llum típicament quàntic, com el que emet espontàniament un àtom excitat permanentment per un làser ressonant, produeix un senyal $C(\tau)$ amb un mínim a l'origen. Els fotons s'emeten ara de manera espaiada en el temps (*anti-bunched*), atès que en emetre un segon fotó fa que el làser incident l'exciti de nou. Per descomptat, l'interval de temps entre dues excitacions successives depèn de la intensitat del làser. Aquest i molts altres comportaments típicament quàntics han estat observats experimentalment.³

En els seus treballs de 1963, Glauber va definir els camps completament coherents com aquells en què les funcions de correlació poden factoritzar-se a tots els ordres, i demostrà que aquests camps existeixen, en principi, tant en la teoria clàssica com en la quàntica. Fins en aquella època, els estudis de QED s'havien desenvolupat en termes dels estats de Fock (estats amb un nombre de fotons perfectament definit que descriuen el caràcter corpuscular, però no mos-

3. Vegeu, per exemple, M. HENNRICH *et al.* (2005).

tren comportament ondulatori). Glauber va fer servir els estats coherents per a demostrar que constitueixen una base de l'espai dels estats del camp. Es fan servir per a representar estats i operadors del camp arbitrari. La representació en termes dels estats coherents permet apreciar clarament la diferència essencial entre les descripcions clàssica i quàntica del camp, encara que les formulacions apareguin com a formalment anàlogues.

Els estats coherents són combinacions lineals de tots els estats de Fock i realitzen el millor compromís per a les relacions d'indeterminació entre els caràcters corpuscular i ondulatori del camp. Per això es diu que tenen caràcter mínim. La seva expressió per a un mode del camp, descrit pels operadors a i a^+ que aniquilen i creen fotons, és donada respectivament per:

$$|\alpha\rangle = \exp\left(-\frac{1}{2}|\alpha|^2\right) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\alpha^n}{\sqrt{n!}} |n\rangle$$

23

on α és un número complex i $|n\rangle$ un estat de Fock amb $n = 0, 1, 2, \dots$ fotons.

ESPECTROSCÒPIA LÀSER DE PRECISIÓ

En espectroscòpia s'analitza la llum emesa, absorbida o modificada per la matèria. S'obté així informació molt valuosa sobre l'estructura d'àtoms i molècules per a distingir cèl·lules canceroses de cèl·lules normals, per a detectar contaminació atmosfèrica, etc. De fet, la importància de l'espectroscòpia havia estat reconeguda amb la concessió del Premi Nobel en vuit ocasions anteriors.

En espectroscòpia d'alta precisió i d'alta resolució cal una radiació làser estable i àmpliament sintonitzable, i també

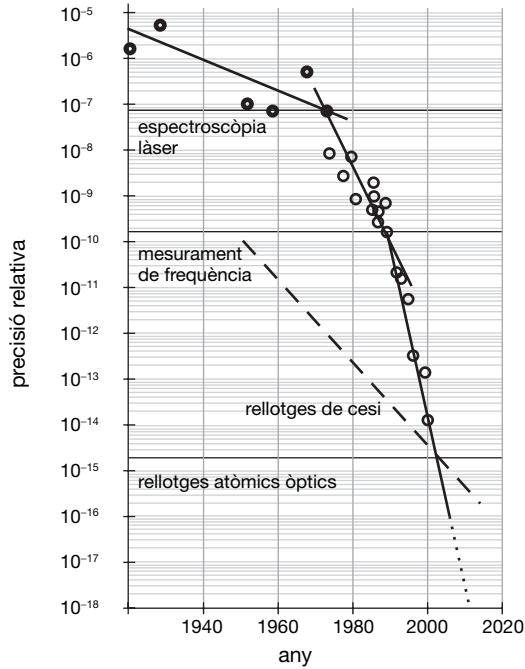


FIGURA 6. Evolució temporal de la precisió relativa en espectroscòpia de precisió.

obtenir la mesura absoluta de la freqüència d'aquesta llum (alguns centenars de THz) en comparació amb el patró primari de cesi, que opera a 9,2 GHz.

J. L. Hall i T. W. Hänsch han liderat un progrés espectacular en el desenvolupament de mètodes per a produir i mesurar freqüències òptiques, amb una precisió actual de quinze xifres significatives i un potencial de divuit, limitada pel soroll quàntic associat a l'emissió espontània de làsers. Aquests tipus de mesures són les que tenen una precisió més gran en tota la física. Cal pensar que una precisió d'una part

en 10^{15} és equivalent a mesurar una distància d'un milió de quilòmetres amb un error d'una micra (figura 6). En aquesta figura 6 s'observen canvis significatius en la pendent de l'evolució temporal de la precisió relativa, que es van produir cap al 1970 amb l'arribada dels làsers sintonitzables, i cap al 1990 amb les mesures absolutes de la freqüència amb el patró de cesi. Actualment, els rellotges atòmics que treballen amb transicions òptiques estan prenent el relleu al rellotge de cesi.

QUINES SÓN LES RAONS PER A CONTINUAR AUGMENTANT LA PRECISIÓ I LA RESOLUCIÓ?

Les principals raons són de caràcter fonamental i aplicat. En augmentar la precisió i la resolució s'espera descobrir nova física (*just the next decimal*). La història de l'espectroscòpia atòmica és un paradigma en aquest sentit. La figura 7 mostra part de l'espectre de l'hidrogen i els poders resolutius necessaris per a observar les diverses estructures de nivells. Inicialment, es va descobrir un espectre de línies discret; quan el poder resolutiu assolí 10^5 aparegué l'anomenada *estructura fina*, associada amb l'espín de l'electró. Amb el poder resolutiu de 10^7 es descobrí l'*estructura hiperfina*, associada a l'espín nuclear, i els desplaçaments de Lamb (*Lamb shifts*), fenòmens de QED associats a fluctuacions quàntiques del buit de radiació.

Partint de l'experiència, tot augmentant la precisió i la resolució, s'espera poder descobrir fenòmens nous no previstos per les teories actuals. Per exemple, actualment s'estan realitzant mesures espectroscòpiques de gran precisió per tal de respondre la pregunta següent: són estables en el temps les constants fonamentals? La constant rellevant, en aquest cas, és l'anomenada *estructura fina*, α . Els últims resultats expe-

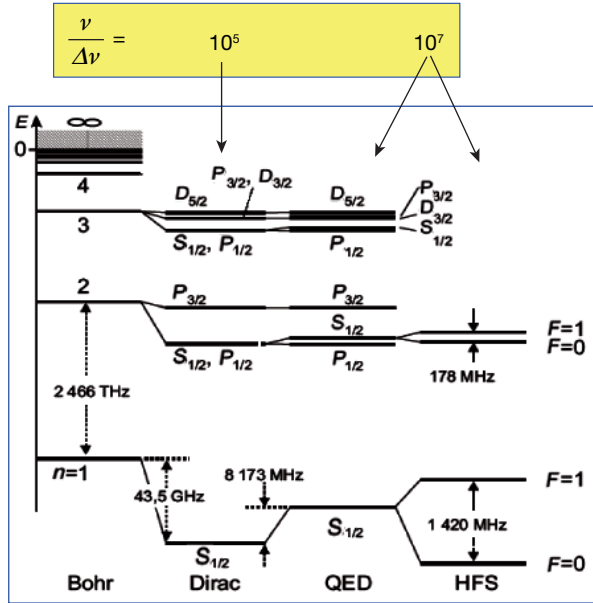


FIGURA 7. Part del diagrama de nivells de l'espectre de l'hidrogen.

rimentals indiquen que, si canvia, la variació relativa en un any és menor de 10^{-15} . Una altra qüestió de gran transcendència, que s'està investigant mitjançant la comparació dels espectres de l'hidrogen i de l'antihidrogen (creat en l'Organització Europea per a la Recerca Nuclear [CERN]), és determinar si existeixen o no asimetries entre matèria i antimatèria. Si no n' existeixen, els espectres de l'hidrogen i de l'antihidrogen han d'ésser idèntics.

També hi ha motivacions de tipus més pràctic. Augmentar la precisió en la determinació de freqüències òptiques implica una millora en els rellotges atòmics, la qual cosa significa millors sistemes GPS, millor navegabilitat, millor control de les xarxes de telescopis astronòmics, etc.

J. L. Hall i T. W. Hänsch han estat autèntics pioners en el camp de l'espectroscòpia làser de precisió, a banda d'haver desenvolupat la tècnica de la pinta de freqüències òptiques. Comentem a continuació alguna de les seves contribucions a l'espectroscòpia de precisió i deixem per al darrer epígraf la pinta de freqüències òptiques.

Al llarg de més de quatre dècades, Hall ha treballat per tal de millorar la precisió i estabilitat amb què els làsers produeixen una freqüència específica. Ha desenvolupat mètodes potents per a estabilitzar la freqüència mitjançant l'ancoratge (*locking*) de la freqüència del làser bé en ressonàncies de transmissió molt estretes de resonadors passius d'elevada finesa, o bé en transaccions atòmiques o moleculars molt estretes. Va fer servir realimentació electrònica. En la dècada de 1960 va desenvolupar un làser d'heli-neó estabilitzat a una transició del metà, amb el qual posteriorment va mesurar la velocitat de la llum amb una precisió cent vegades millor que l'obtinguda fins llavors.⁴ En aquest treball va notar que la principal limitació per a la precisió procedia de l'asimetria de la línia a 6.057 àngstroms del criptó, que llavors es feia servir per a definir el metre. Aquests i altres treballs similars conduïren l'any 1983 a un canvi en la definició del metre: es va fixar la velocitat de la llum exactament amb el valor $c = 299.792.458$ m/s i es va redefinir el metre com la distància que recorre la llum en $1/299.792.458$ s. Per tant, des de llavors, per a realitzar una mesura absoluta de la longitud d'ona d'un làser cal mesurar-ne la freqüència ν , a continuació, dividir c pel valor mesurat $\lambda = c/\nu$. Es planteja, per tant, el problema de mesurar freqüències òptiques,

4. K. M. EVENSON *et al.* (1972).

que, com veurem en l'epígraf següent, va resultar més complicat.

A la vegada, Hänsch ha portat a terme al llarg de més de tres dècades un ampli ventall d'experiments en àrees molt variades de la física atòmica i l'òptica. Per exemple, el 1972, juntament amb A. L. Schawlow (premi Nobel 1981), va realitzar la primera observació òptica del desplaçament de Lamb en l'estat $n = 2$ de l'hidrogen havent mesurat la freqüència de la transició 1s-2s, la constant de Rydberg i nombrosos desplaçaments de Lamb. La seva determinació més recent de la freqüència de la transició 1s-2s és:⁵

$$f_{1s-2s} = (2\,466\,061\,102\,474\,851 \pm 34) \text{ Hz}$$

Hänsch va ésser també un dels primers a considerar, l'any 1975, el refredament làser en termes teòrics. Cal recordar que S. Chu, C. Cohen-Tannoudji i W. D. Phillips guanyaren l'any 1997 el Premi Nobel per haver desenvolupat aquestes tècniques.

Més recentment, el seu grup ha portat a terme alguns dels experiments més citats amb condensats atòmics de Bose-Einstein (BEC). Per exemple, l'obtenció de BEC en un xip, és a dir, amb un dispositiu experimental de dimensions unes cent vegades inferiors a les dels dispositius habituals.⁶ Com també la primera observació experimental d'una transició de fase quàntica, la transició de Mott superfluid-aïllant, amb un BEC atrapat en un potencial òptic periòdic (*optical lattice*).⁷

5. M. FISCHER *et al.* (2004).

6. W. HÄNSEL *et al.* (2001).

7. M. GREINER *et al.* (2002).

Comparada amb el patró primari de cesi, que opera al voltant de 10^{10} Hz, la mesura absoluta de freqüències òptiques, que és de prop de 10^{15} Hz, fou un problema molt complicat. La raó és que, en superposar dues radiacions en un mateix detector fotoelèctric, s'obté un senyal modulat (*beating signal*) a la diferència de freqüències d'aquestes radiacions solament si la diferència no excedeix d'algunes desenes de GHz. Com que la diferència entre les freqüències òptiques i la del patró de cesi és molt més gran que la freqüència de tall dels detectors, no és possible realitzar la mesura absoluta de freqüències òptiques de manera simple. Fins a l'any 2000, amb el desenvolupament de la tècnica de freqüències òptiques per part dels guardonats, la mesura es duia a terme mitjançant cadenes de freqüències per multiplicació d'harmònics (CFMH). Les CFMH són sistemes complexos, formats per molts components diferents, que són difícils de manejar i costosos. Com es veu a la figura 8, el punt de partida d'una CFMH és un oscil·lador de microones (*intermediate oscillator*), la freqüència de la qual pot determinar-se directament

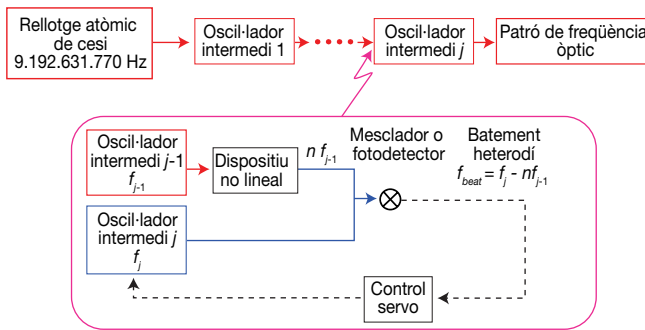


FIGURA 8. Esquema d'una cadena de freqüències per multiplicació d'harmònics.

amb el patró de cesi. A continuació, i mitjançant un dispositiu no lineal adequat, es generen harmònics d'aquest oscil·lador. L'harmònic d'ordre n es mescla en un detector amb l'oscil·lador intermedi següent de la cadena i el senyal de batement a la freqüència diferència es fa servir per a estabilitzar la freqüència del segon oscil·lador. Tot aquest procés es repeteix fins a connectar el patró de cesi amb el domini òptic de l'espectre. A la pràctica, aquests esforços heroics solament es varen portar a terme en alguns laboratoris dels països científicament més avançats.

Amb el desenvolupament de la tècnica de la pinta de freqüències òptiques el procés de mesurament s'ha simplificat enormement.

PINTA DE FREQUÈNCIES ÒPTIQUES

30

La pinta de freqüències òptiques té dos components essencials: un làser de femtosegons i una fibra òptica de cristall fotònic. Ambdós components han estat desenvolupats per separat, per altres investigadors i amb finalitats diferents. Hall i Hänsch els combinaren adequadament per tal de resoldre el problema de mesurament de freqüències òptiques d'una manera molt flexible, senzilla i elegant. La figura 9 mostra l'esquema làser que emet un tren de polsos d'una durada d'alguns femtosegons ($1 \text{ femtosegon} = 10^{-15} \text{ s}$). La separació entre polsos és molt més gran, d'algunes desenes de nanosegons ($1 \text{ nanosegon} = 10^{-9} \text{ s}$). Per a fer possible aquest tipus d'emissió el làser ha d'acomplir dues missions: 1) ha de poder operar simultàniament amb un gran nombre de modes de la cavitat (diversos centenars de milers), que tenen freqüències equiespaiades. I 2), el medi material del làser ha de tenir una amplada de banda d'amplificació suficientment gran, condició que tenen els materials sòlids com ara el Ti:safir o els líquids

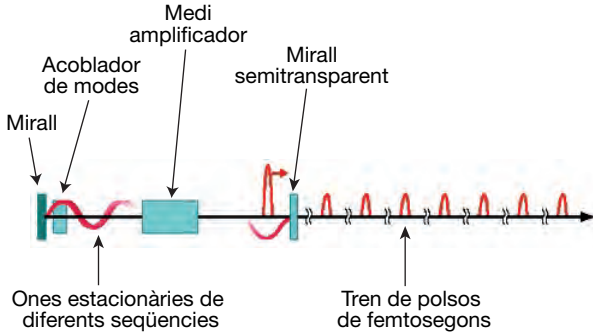


FIGURA 9. Esquema d'un làser de femtosegons.

com els colorants orgànics. A més, els diferents modes de la cavitat han de mantenir entre si una relació de fase constant. D'introduir aquesta coherència entre els modes se n'encarrega l'acoblador de modes (*mode locker*), constituït en molts casos per un medi no lineal amb una no-linealitat de tipus Kerr i un diafragma. Tots els elements que hem esmentat donen el nom complet al làser freqüentment utilitzat en les pintes de freqüències: *Kerr-lens mode-locked femtosecond Ti:sapphire laser* (làser Ti:safir generador de polsos de femtosegons basat en el bloqueig en el mode per l'efecte de lent de Kerr).

La figura 10 mostra imatges de l'emissió del làser, en el domini temporal i en l'espectral. L'espectre d'emissió del làser consisteix en un ampli conjunt de modes amb freqüències equidistants, separades per la freqüència $\omega_r = 2\pi/T$, en què T és el període de temps que separa dos polsos consecutius. Aquest període es pot mesurar fàcilment en relació amb el patró de cesi detectant la seqüència de polsos làser.

L'amplada de banda d'emissió $\Delta\omega$ depèn del medi amplificador del làser. Quan se sumen coherentment els camps elèctrics de les ones associades als diferents modes s'obté la imatge temporal de l'emissió. Consisteix en una ona portadora

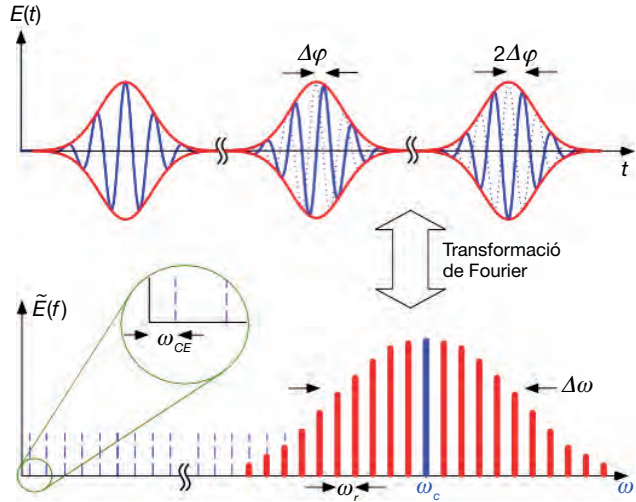


FIGURA 10. Evolució temporal del camp elèctric de l'ona emesa per un làser de femtosegons i composició espectral de l'ona.

32

de freqüència ω_c , modulada per una envolupant. Com que la portadora es propaga a la velocitat de fase i l'envolupant a la velocitat de grup, entre polsos consecutius es produeix un desfasament $\Delta\varphi$ entre la portadora i l'envolupant. Com a conseqüència d'això, la freqüència dels diferents modes no és exactament un múltiple sencer n de la freqüència de repetició $f_r = 2\pi\omega_r$, sinó que hi ha un desplaçament global f_{CEO} . Per tant,

$$f_n = nf_r + f_{CEO}$$

La determinació experimental de f_{CEO} resultà més complicada que la de f_r . Hall i Hänsch trobaren una solució molt enginyosa i elegant a aquest problema, utilitzant el segon element essencial de la pinta de freqüències, la fibra òptica de cristall fotònic (figura 11).

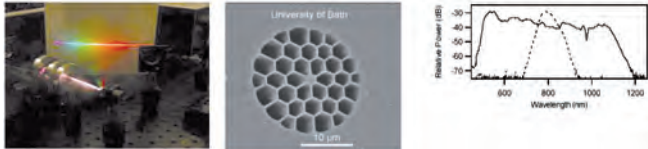
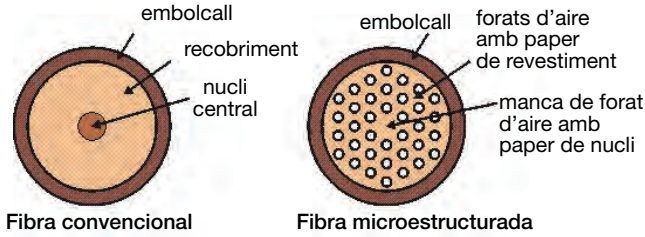


FIGURA 11. A la part superior, esquemes d'una fibra òptica convencional i d'una fibra microestructurada o de cristall fotònic. A la part inferior, al centre, microfotografia d'una fibra òptica de cristall fotònic; a la dreta, s'observa l'espectre de la llum injectada en la fibra i el de la llum emergent; a l'esquerra, la llum a la sortida, dispersada per una xarxa de difracció, cobreix tot l'espectre visible.

Les fibres òptiques convencionals tenen dos materials transparents, el d'índex de refracció més gran forma el nucli central (*core*) i està rodejat del que té l'índex més petit (*cladding*). La llum es propaga pel nucli central, confinada per reflexió total en la superfície de separació amb el *cladding*. A les fibres de cristall fotònic (també anomenades *microestructurades*) el paper del *cladding* el desenvolupa una estructura periòdica de forats d'aire que s'estén al llarg de tota la fibra, i el paper del nucli, un defecte central o manca de forat d'aire en l'estructura periòdica (vegeu també la microfotografia central a la segona fila de la figura 11). La llum es propaga estretament confinada en el defecte central. A més, si es dissenya adequadament l'estructura de forats, es pot obtenir una dispersió cromàtica molt petita que fa que els polsos de llum que es propaguen s'ampliïn molt poc en el

temps. Com a conseqüència de l'acusat confinament espacial i temporal de la llum, la intensitat en el defecte és molt gran i origina fenòmens no lineals molt importants. En concret, mitjançant el procés no lineal de barreja de quatre ones, es generen noves freqüències equidistants amb les que ja estan presents i l'espectre global de la llum a la sortida de la fibra apareix molt ampliat. A la figura 11 això es pot apreciar en els extrems de la fila inferior: a l'esquerra, es veu com la llum a la sortida cobreix tot l'espectre visible; a la dreta, s'observa l'espectre de la llum injectada en la fibra i el de la llum emergent. S'aprecia que aquest últim espectre cobreix un interval més gran que el que va de longitud d'ona λ a la 2λ . Aquest últim interval s'anomena *octava* de l'espectre.

Una vegada que disposem d'un espectre de mode que cobreix una octava, podem determinar experimentalment la freqüència f_{CEO} en la forma esquematitzada a la figura 12.

Generant el segon harmònic del mode n i superposant-lo en un detector amb el mode $2n$, la freqüència de batement proporciona la freqüència diferència, que no és altra que f_{CEO} .

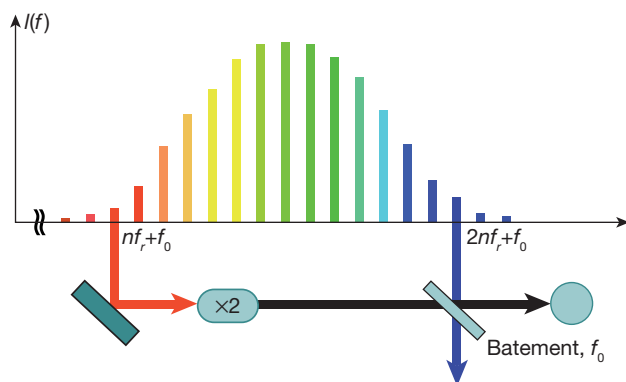


FIGURA 12. Esquema d'una pinta de freqüències que abasta una octava de l'espectre i permet determinar f_{CEO} .

Un cop determinats f_r i f_{CEO} en relació amb el patró de cesi tenim ja un coneixement absolut de les freqüències de tots els modes de l'espectre.

El conjunt de tots els modes forma una mena de pinta de freqüències (encara que no totes les seves pues tinguin la mateixa alçada) que cobreix tot l'espectre visible i pot fer-se servir com una regla per a determinar freqüències òptiques desconegudes f_{opt} . Per fer-ho, basta superposar en un detector la radiació que cal mesurar amb el mode n de la pinta més propera i determinar la freqüència de batement entre ambdues f_{beat} . En resulta:

$$f_{opt} = nf_r + f_{CEO} + f_{beat}$$

Aquest tipus de pintes de freqüències ja són disponibles comercialment i s'espera que revolucionin el camp de la metrologia de freqüències i temps.

BIBLIOGRAFIA

- EVENSON, K. M. [*et al.*] (1972). «Speed of light from direct frequency and wavelength measurements of the methane-stabilized laser». *Physical Review Letters*, núm. 29, p. 1346-1349.
- FISCHER, M. [*et al.*] (2004). «New limits on the drift of fundamental constants from laboratory measurements». *Physical Review Letters*, núm. 92, p. 230802.
- GLAUBER, R. J. (1963a). «Photon correlations». *Physical Review Letters*, núm. 10, p. 84-86.
- (1963b) «The quantum theory of optical coherence». *Physical Review*, núm. 130, p. 2529-2539.
- (1963c) «Coherent and incoherent states of the radiation field». *Physical Review*, núm. 131, p. 2766-2788.

- GREINER, M. [*et al.*] (2002). «Quantum phase transition from a superfluid to a Mott insulator in a gas of ultracold atoms». *Nature*, núm. 415, p. 39-44.
- HANBURY-BROWN, R.; TWISS, R. Q. (1956). «Correlation between photons in two coherent beams of light». *Nature*, núm. 177, p. 27-32.
- HÄNSEL, W. [*et al.*] (2001). «Bose-Einstein condensation on a microelectronic chip». *Nature*, núm. 413, p. 498-501.
- HENNRICH, M. [*et al.*] (2005). «Transition from antibunching to bunching in cavity QED». *Physical Review Letters*, núm. 94, p. 053604.

WEBS

<http://www.nobelprize.org>

<http://www.quantumoptics.at>

<http://www.quantumoptics.net>

<http://www.colorado.edu/physics/2000/index.pl>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Laser>